

一様等方性乱流中の coherent 微細渦に作用する歪み場とエネルギー散逸率

東工大工 店橋 護 (Mamoru Tanahashi)

東工大院 岩瀬 識 (Shiki Iwase)

東工大工 宮内 敏雄 (Toshio Miyuchi)

1. 緒論

乱流中には Kolmogorov scale 程度の微細な渦管が存在し、乱流エネルギー散逸率の間欠性に深く関わっていると考えられている。著者らは以前の研究において一様等方性乱流^{1,2)}、乱流混合層^{3,4)}、channel 乱流⁵⁾及び MHD 乱流⁶⁾中の coherent 微細渦を抽出し、それらの統計的性質を検討した。その結果、すべての乱流場において coherent 微細渦は平均的に Kolmogorov scale の約 10 倍の直径と二乗平均変動速度 (u_{rms}) の 0.5 倍程度の最大周方向速度を有していることを明らかにした。その平均周方向速度分布は Burgers 渦により良く近似することができるが、乱流の coherent 微細渦を完全な軸対称 Burgers 渦で近似することは必ずしも適当ではない。

Moffatt ら⁷⁾は乱流の微細渦として外部歪みを受けた Burgers 渦を仮定し、摂動法を用いて解析した結果、散逸率の分布に非対称性が現れることを示した。また Prochazka ら⁸⁾は、より一般的な歪み比に対して数値解析を行い同様の結果を得ている。これらの研究は、乱流中の微細渦が回転軸と垂直な平面内で二方向から異なる大きさの歪みを受ける Burgers 渦によって近似できるとの仮定に基づいているが、これらの仮定を裏付ける直接的な根拠は無い。そこで、本研究では一様等方性乱流の直接数値計算(DNS) 結果から coherent 微細渦を抽出し、coherent 微細渦に作用する歪み率と散逸率の関係を明らかにする。

2. Coherent 微細渦に作用する歪み率

本研究では、以前の一様等方性乱流の微細渦に関する研究において抽出した

coherent 微細渦を解析の対象とする。すなわち、テイラー・マイクロスケール(λ)に基づく Reynolds 数 (Re_λ) が約 40 から 90 の三種類の DNS データから抽出した coherent 微細渦である。解析は直径が Kolmogorov scale の 20 倍以下の coherent 微細渦を対象として行なった。これは乱流中の coherent 微細渦の 90%以上に対応する。

図 1 は coherent 微細渦中心における歪みテンソル S_{ij} の固有値の確率密度関数 (PDF) を示している。ここで α は最小固有値, β は中間固有値, γ は最大固有値に対応し, λ と u_{rms} を用いて正規化されている。このような正規化を行うことにより, coherent 微細渦に作用する歪み率の PDF は Re_λ にほとんど依存しない。また, α と γ の PDF はそれぞれ -1 と $+1$ 付近でピークを示している。

次に, S_{ij} の固有ベクトル $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ と coherent 微細渦の回転軸がなす角を図 2 のように θ, ψ, ϕ と定義する。ここで, $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ はそれぞれ固有値 α, β, γ に対応する固有ベクトルである。図 3 は $\cos\theta, \cos\psi, \cos\phi$ の PDF を示している。歪み率の作用する方向と回転軸がなす角の PDF もほとんど Re_λ に依存しない。 $\cos\theta$ の PDF (図 3(a)) は全ての Re_λ の場合において 0 でピークを示している。このことは最小歪み率 α の作用する方向と coherent 微細渦の回転軸が平均的に直交することを示している。 $\cos\psi$ の PDF (図 3(b)) は ± 1 でピークを示しており, 回転軸と中間歪み率の作用する方向が平行である確率が最も高い。 $\cos\phi$ の PDF (図 3(c)) は 0 付近と ± 1 付近でピークを示しているが, Re_λ の増加に伴い $\cos\phi = 0$ の存在確率が上昇している。これは Re_λ の増加と共に, 最大歪み率の作用する方向と直交する回転軸を持つ coherent 微細渦が増加することを示している。これらの PDF から, 回転軸と中間歪み率の作用する方向が平行で, 軸と垂直な二方向から大きな圧縮と伸長を受ける微細渦が乱流中には最も多く存在していることがわかる。ここで, 歪み率と散逸率との関係を検討するために歪み率の比 $\sigma = (\gamma + \beta)/(\gamma - \beta)$ を定義する。 $\sigma < 1$ の coherent 微細渦は中間歪み率 (β) の方向へ伸長を受け, $\sigma > 1$ となる coherent 微細渦は中間歪み率の方向から圧縮を受ける。図 4 は σ の PDF を示している。PDF は $\sigma = 0.5$ 付近でピークを示し, 中間歪み率の方向へ伸張を受ける微細渦の存在確率が高いことがわかる。図 5 は $Re_\lambda = 87.9$ の場合に対して σ により条件付けた回転平面上の位相平均エネルギー散逸率の分布を示している。ここで, 位相平均は周方向速度の $k_\theta = 2$ のモードを基準に行われており⁹⁾, 散逸

率は coherent 微細渦中心における値で正規化されている。また、等値線の間隔は 0.5 であり、明るい領域ほど散逸率は高い値を示す。図に示した領域の半径は coherent 微細渦半径 (r_c) の 2.5 倍である。以前の研究⁹⁾で示したように、回転平面内において周方向速度の等値線は明確な楕円形を示す。 $\sigma \leq 1$ の場合、散逸率は楕円の長軸上 $1.4r_c$ 付近で非常に大きな値を示している。これら散逸率のピークは $0.4 < \sigma \leq 0.6$ で最も大きく、中心の散逸率の 4.4 倍に達する。また、散逸率の極小点が短軸上に形成されている。 σ の増加とともに、散逸率の大きな領域は微細渦周囲に広がり、その値も減少する。これとともに、短軸上で散逸率が極小となる 2 つの領域はその間隔を狭め、 $1.8 < \sigma \leq 2.0$ の場合 coherent 微細渦の中心で散逸率は極小となる。

3. 結論

一様等方性乱流中の coherent 微細渦に作用する歪み率と散逸率の関係を検討し、次のような結論を得た。

1. Coherent 微細渦に作用する歪み率の大きさは $O(u_{rms} / \lambda)$ であり、 λ と u_{rms} を用いて正規化を行うとその確率密度関数は Re_λ に依存しない。また、coherent 微細渦は回転軸に垂直な平面内で歪みテンソルの最小固有値 (α) と最大固有値 (γ) の二方向から平均的に強い圧縮と伸張を受け、中間固有値 (β) の固有ベクトルと平行となる傾向がある。
2. 歪み率比 $\sigma = (\gamma + \beta) / (\gamma - \beta)$ により、coherent 微細渦の散逸率の分布を整理することができ、 σ が小さな場合には楕円形の微細渦の短軸上に 2 つの散逸率の極小点を、長軸上に 2 つの極大点を持つ。極大値は $0.4 < \sigma \leq 0.6$ で中心の散逸率の 4.4 倍に達する。 σ の増加とともに、散逸率の大きな領域は値を減少しながら微細渦周囲に広がり、coherent 微細渦は中心で一つの散逸率の極小点を持つようになる。

参考文献

- 1) M. Tanahashi, T. Miyauchi & T. Yoshida : *Transport Phenomena in Thermal-Fluid Eng.*, 2 (1996) 1256.

- 2) M. Tanahashi, T. Miyauchi & J. Ikeda : *IUTAM Symp. Simulation and Identification of Coherent Structure in Flows* (Kluwer Academic Publishers, 1999) 131.
- 3) M. Tanahashi, T. Miyauchi & K. Matsuoka : *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 2 (1997) 461.
- 4) M. Tanahashi, T. Miyauchi and K. Matsuoka, *Proc. IUTAM/IUGG Symp. Developments in Geophysical Turbulence* (1998) in press.
- 5) 店橋・宮内・ダス・小路 : 日本機械学会論文集 (B編), 65-638 (1999) 3237-3243.
- 6) 店橋・辻本・カリム・藤村・宮内: 日本機械学会論文集 (B編), 65-640 (1999) 3884-3883.
- 7) H. K. Moffatt, S. Kida & K. Ohkitani : *J. Fluid Mech.* 259 (1994) 241.
- 8) A. Prochazka & D. I. Pullin : *J. Fluid Mech.* 363 (1998) 199
- 9) 岩瀬・店橋・宮内 : 数値流体シンポジウム講演論文集, (1998) 413.

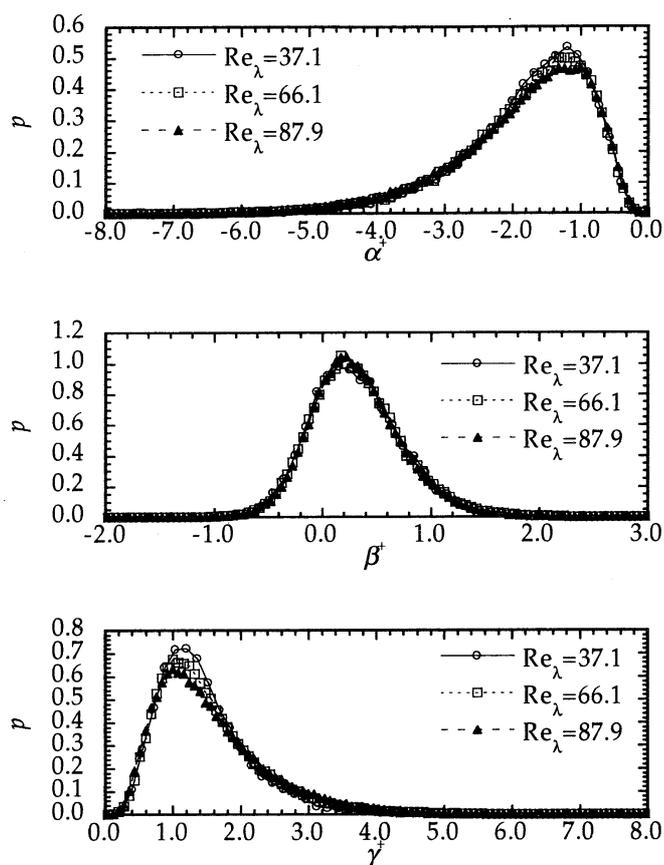


Fig. 1 Probability density functions of eigen values of strain tensor at the center of coherent fine scale eddies.

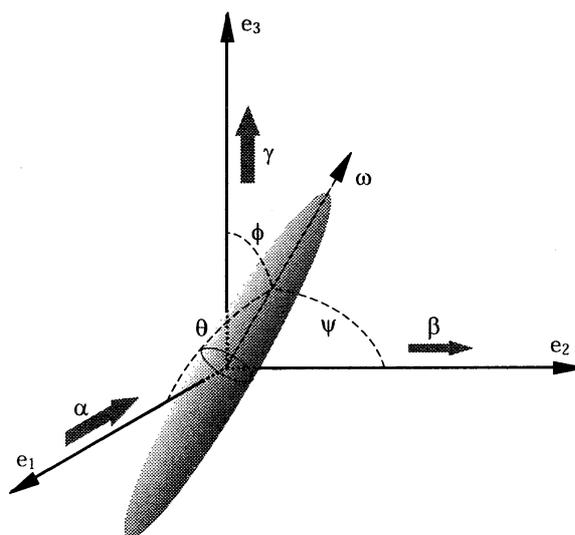


Fig. 2 Definition of angles between rotating axis and eigen vectors of strain tensor.

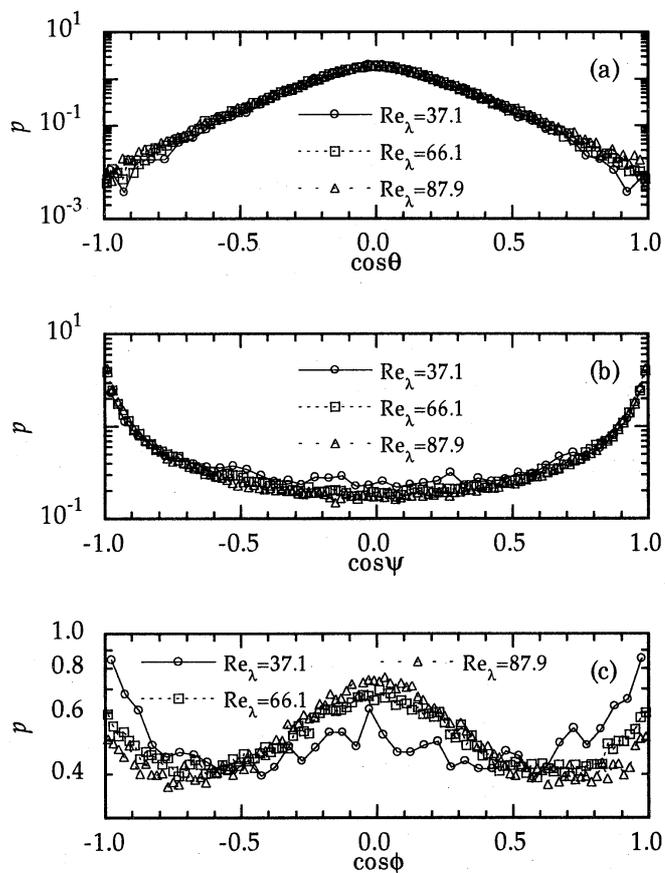


Fig. 3 Probability density functions of the cosine of angles between rotating axis and eigen vectors of S_{ij} .

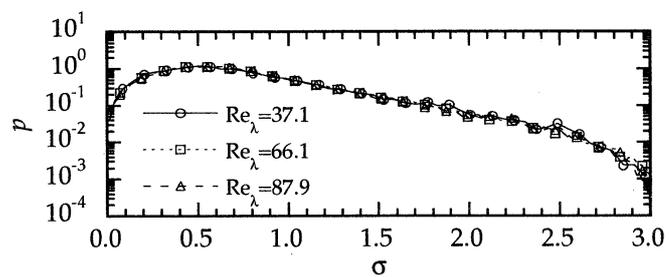


Fig. 4 Probability density function of σ .

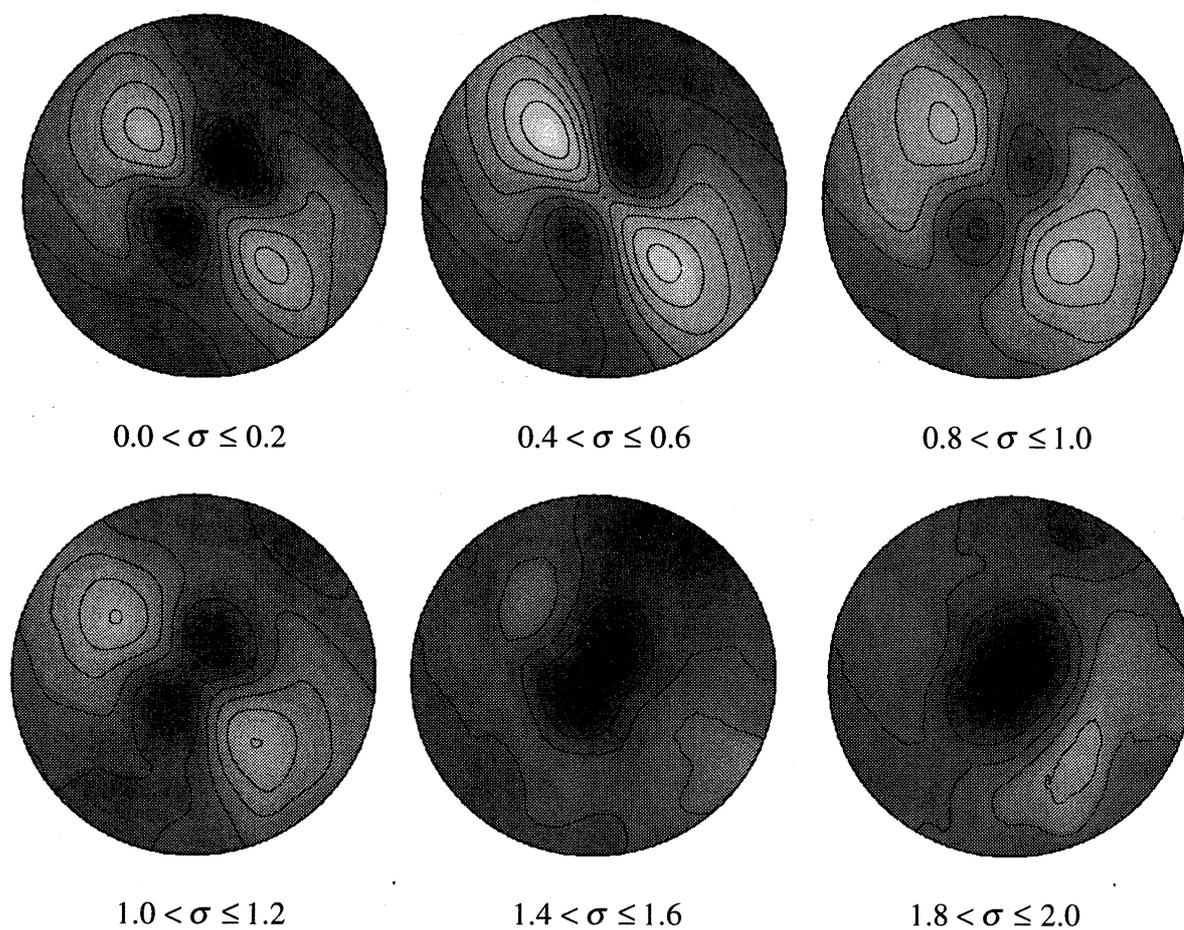


Fig. 5 Distributions of phase-averaged dissipation rate around coherent fine scale eddies conditioned by σ .